

氏名	日暮 凌太 (ひぐらし りょうた)
学位の種類	博士 (理学)
報告番号	甲第607号
学位授与年月日	2023年3月31日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号) 第4条第1項該当
学位論文題目	<i>Fermi</i> -LAT Study of the Vela Supernova Remnant and X-ray Hotspot in Supernova Remnants RX J1713.7-3946 and W50 ( <i>Fermi</i> -LAT を用いた Vela 超新星残骸のガンマ線解析と超新星残骸 RX J1713.7-3946 と W50 の X 線ホットスポットの研究)
審査委員	(主査) 北本 俊二 (立教大学大学院理学研究科教授) 山田 真也 (立教大学大学院理学研究科准教授) 原田 知広 (立教大学大学院理学研究科教授) 内山 泰伸 (立教大学大学院人工知能科学研究科教授)

## I. 論文の内容の要旨

### (1) 論文の構成

本論文は、宇宙線発見以来、未だ解決できていない、宇宙線、特に電子と陽電子の加速現場の証拠を掴もうとする研究である。論文は、1章で宇宙線加速に関する簡潔なまとめと問題提起をおこなう。2章では、これまでの研究のレビューとして、宇宙線の観測的研究の最近の話題、特に本論文に密接に関係する、電子または陽電子の観測結果の現状と、陽電子超過と呼ばれる問題を説明する。そして、本論文で加速現場として注目する超新星残骸とそこでの粒子加速の研究の現状、粒子加速機構の理論的概説、高エネルギー粒子からの電磁波の放射、本論文で扱う3個の超新星残骸の概説を行う。第3章では、本論文で使用する観測データを取得したガンマ線観測衛星 Fermi Gamma-ray Space Telescope と Chandra X-ray Observatory の概説と検出器の特性を説明する。第4章で、本論文で行う研究の動機をまとめる。第5章では、ガンマ線観測データを詳細に解析し、Vela 超新星残骸全体の広がった領域からガンマ線が放射されている事を、世界で初めて明らかにする。第6章では、超新星残骸 RXJ1713.7-3946 の X 線の像、およびエネルギースペクトルを解析することで、超新星残骸内での点状 X 線源を集中的にしらべ、点状領域での、高エネルギー粒子の振る舞いを推定する。第7章では、マイクロクエーサー SS433 に伴う超新星残骸 W50 の点状 X 線源からのガンマ線の検出を試み、ガンマ線強度の上限を与え、高エネルギー粒子の起源を議論する。第8章に本論文全体の要約を示す。

### (2) 論文の内容要旨

本論文では、太陽系に到来する宇宙線、特に電子または陽電子(以降「電子成分」と書く)の起源を探ることが目的である。

論文内容は、大きく二つに分けることができる。一つ目は、Vela 超新星残骸からのガンマ線の検出に関する研究である。電子成分は宇宙磁場により直進できず、また、宇宙空間飛来中のエネルギー損失も大きいので、遠くから太陽系まで到来できない。Vela 超新星残骸は我々太陽系の比較的近傍にある超新星残骸であるので、太陽系に到来する電子成分の加速現場の候補である。しかしながら、これまで、Vela 超新星残骸での電子成分の加速を裏付ける証拠は無かった。Vela 超新星残骸はおよそ8度に渡る見かけの大きさを持つ。標準的な解析では、広がった領域からのバックグラウンドを超えるガンマ線放射の超過成分

を見出すことは、困難であった。本論文では、Fermi ガンマ線観測望遠鏡のデータを詳細に注意深く解析する。長期にわたるデータを集積しつつ、超新星残骸の中心に位置するパルサーからの寄与を取り除くことで、Vela 超新星残骸全体に広がったガンマ線放射が有意に存在することを初めて明らかにする。さらに、見かけの大きさが大きいことで、ガンマ線の明るさ、およびエネルギースペクトルの空間構造の存在も明らかにした。エネルギースペクトルからは数 100 GeV 以上まで続くガンマ線を有意に検出した。また、このガンマ線のエネルギースペクトルの冪指数から逆コンプトン散乱が起源であると考察し、数 TeV のエネルギーを持つ電子成分の存在を示した。

二つ目は、超新星残骸の X 線像に見られる点状 X 線源の研究である。電子成分がシンクロトロン放射していると考えられている超新星残骸 RXJ1713.7-3946 にはたくさんの点状 X 線源が存在する。本論文では、その点状 X 線源を丹念に抽出し、個々の点状 X 線源のエネルギースペクトル、および、いくつかの点状 X 線源の強度が月から年の時間尺度で変動していることを明らかにした。そして、点状 X 線源は、粒子密度の濃い領域において圧縮されて強くなった磁場の中に高エネルギー電子成分が侵入した時の放射であり、電子成分は超新星残骸内でもエネルギー損失をしている事を議論した。また、超新星残骸 W50 で知られている点状 X 線源からのガンマ線放射の探索を行い、その上限値を求めた。求めた上限値は、高エネルギー電子の存在とは矛盾しないことを結論した。

これらの内容を合わせて、超新星残骸で高エネルギー電子成分が存在していること、特に、我々から近傍の超新星残骸である Vela 超新星残骸の広がった領域での高エネルギー電子成分の存在を明らかにし、我々の観測する電子成分の起源として有力であることを示した。また、高エネルギー電子成分の超新星残骸中での振る舞いに関する観測的示唆を与えた。

## II. 論文審査の結果の要旨

### (1) 論文の特徴

宇宙線加速の問題は、宇宙線発見以降 1 世紀以上を経過する中、未だ、決定的な説明はされておらず、興味ある物理現象として研究が続けられている。そんな中、最近の 10 年あたりで明らかになった陽電子過剰問題(陽電子の電子に対する存在比が数十 GeV 以上で、従来の標準的な理論値に比べて大きくなるのが観測的に報告されている問題)が注目を浴びている。本論文は、この陽電子過剰問題を意識して、従来から、我々が観測する電子や陽電子の加速現場候

補として考えられている近傍の超新星残骸に目をつけた。特に、Vela 超新星残骸では、これまで超新星残骸自体からのガンマ線の検出の報告はなく、高エネルギー電子成分の存在自体が観測的に明らかでないことから、独自に創意工夫を行いガンマ線の検出を試みた。Fermi ガンマ線観測望遠鏡により 2008 年以來蓄積された膨大なデータを丁寧に解析した。この天体では、特に超新星残骸の中心にあるパルサーからのガンマ線の影響が大きく、超新星残骸全体に広がった成分を検出することは、標準的な解析手法では困難である。そこで、パルサーの放射が無い位相だけを抽出するという方法でパルサーの影響を低減し、標準的な解析では困難な領域に対してグリッドベースの解析を用いて輝度分布やバックグラウンドを取り込み、超新星残骸全体に付随した成分を有意に検出したことは本論文の最大の特徴である。また、大きな見かけのサイズを逆に活かして、空間構造を議論し、ガンマ線のエネルギースペクトルも精度良く導出した。そして、少なくとも一部のガンマ線は数 TeV 以上のエネルギーを持つ電子成分による逆コンプトン散乱が起源であることを示したことも特徴である。さらに、二つの超新星残骸での点状 X 線源の特徴を明らかにし、高エネルギー電子成分の超新星残骸内での振る舞いを議論できたことも、特徴である。

## (2) 論文の評価

本論文は、宇宙線観測で指摘されている電子または陽電子(電子成分)の存在とともに、陽電子超過の問題に観測から切り込んだものである。そして、本論文において電子成分の加速場所候補として長く示唆されてきた近傍超新星残骸のうちの一つである Vela 超新星残骸全体に渡る広がった領域から高エネルギー電子成分が起源と思われるガンマ線を世界で初めて検出した。これは、超新星残骸全体に渡り、広がった領域で高エネルギー電子成分が存在していることを示唆している。本論文では、電子成分の加速箇所を特定するには至っていないが、Vela 超新星残骸の広がった領域に存在する高エネルギー電子は、パルサーで加速された電子または陽電子が超新星残骸全体に拡散充満したものなのか、または、超新星残骸全体の広がった領域内で衝撃波等により電子が加速されたものなのか、問題点をより具体的に示した。さらに、超新星残骸内での点状 X 線源での高エネルギー電子成分のエネルギー損失を明らかにしたことも、宇宙線の電子成分の起源の研究に一つの楔を打ちつけたことになる。

このように、本論文は、宇宙線加速の研究、および、観測される電子成分の研究を大きく前進させる論文であり、博士論文の価値があると判断する。